การศึกษาความดันกระแทกของลำพุ่งจากอุปกรณ์นำส่งยาแบบไม่ใช้เข็มที่สร้างจากหลักการกระแทกที่ใช้สปริงเป็นต้นกำลัง

Investigation on Impact Pressure of Needle-free Liquid Jet Generated by Impact Driven Method Powered by Spring Force

กมลชนก อุระ* , วิระพันธ์ สีหานาม และ กุลเชษฐ์ เพียรทอง

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190
อีเมล์: kamoljanok.ura@gmail.com โทร 0-453-53323 โทรสาร 0-45-353308

บทคัดย่อ

ในการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าการสร้างลำพุ่งความเร็วสูงด้วยหลักการกระแทกสำหรับอุปกรณ์นำส่งยาผ่านผิวหนังเป็นวิธีการที่ช่วยให้ลำพุ่งมีคุณลักษณะการนำส่งยาที่ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์สร้างลำพุ่งด้วยหลักการกระแทกที่ผ่านมาจะใช้แก๊สเป็นต้นกำลัง ทำให้อุปกรณ์มีน้ำหนักมาก และมีแนวโน้มที่จะราคาแพง อีกทั้งยังพบปัญหาในการควบคุมความแม่นยำในการฉีดลำพุ่งอีกด้วย ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ในการศึกษานี้จึงได้พัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้สปริงเป็นต้นกำลังแทนการใช้แก๊ส โดยจะทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยจากอุปกรณ์อันได้แก่ ปริมาตรบรรจุของหัวฉีดและค่าคงที่ของสปริง ที่มีต่อความดันกระแทกและความเร็วของลำพุ่ง ในการทดลองนี้ใช้หัวฉีดขนาด 0.2 mm ที่สามารถบรรจุของเหลวได้ 0.2 mL และ 0.5 mL และสปริงมี 3 ขนาดที่ค่าคงที่ 30.9 , 52 และ 104.2 N/m จากการทดลองพบว่าความดันกระแทกสูงสุดของลำพุ่งที่อยู่ในช่วง 2.74 ถึง 488.96 MPa ขึ้นอยู่กับปริมาตรและค่าความแข็งของสปริง ที่ปริมาตรบรรจุและสปริงที่แข็งมากขึ้น ความดันกระแทกจะสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบลักษณะการฉีดเป็นลูกๆ เนื่องจากคลื่นกระแทกของของไหลในหัวฉีดและการสั่นของสปริงระหว่างการสร้างลำพุ่ง

***คำหลัก*:** ลำพุ่งความเร็วสูง, ความดันกระแทก ,หลักการกระแทก

Abstract

In previous study, it was found that high speed liquid jet generated by using Impact Driven Method (IDM) enhances the drug delivery performance of needle-free jet injector. However, the IDM injectors normally powered by gas source are massive and expectably expensive. Moreover there are problem with the imprecise controllable. Therefore, to untangle this problem, in this research, the IDM injector by using spring being power source instead of compressed gas have been developed and investigated. Influence of two parameters being ejected volume and spring constant on impact pressure and jet velocity were explored. In experiment both of 0.2 mL and 0.5 mL nozzle with diameter of 0.2 mm and the device employs the spring constant which are 30.9, 52 and 104.2 N/m are used. It is found that maximum pressures given by the device are around 2.74 and 488.96 MPa. These are depended on injection volume and spring constant. High volume and spring constant gives the high pressure.

Moreover pluses jet injected due to shock wave reflection and oscillation of spring during jet generation are found.

KEYWORDS: high-speed water jet, impact pressure, Impact Driven Method (IDM).

1. บทนำ

ลำพุ่งความเร็วสูง (High speed liquid jet) คือลำพุ่งของเหลวที่ถูกขับออกจากรูขนาดเล็กด้วยแรงดันสูง โดยมีการนำไปประยุกต์ใช้กับงานอย่างกว้างขวาง เช่น งานตัด เจาะหรือขึ้นรูปวัสดุ ส่วนในทางการแพทย์ ลำพุ่งความเร็วสูงถูกนำมาใช้ในการผ่าตัดแทนมีด (Water jet dissection) ศัลยกรรมตกแต่งหลอดเลือด (Water jet angioplasty) และการนำส่งยาผ่านผิวหนังแทนเข็ม (Needle free jet injection) เนื่องจากการฉีดยาโดยการใช้เข็มและไซริงค์ อาจก่อให้เกิดการติดเชื้อทางเลือด และยังมีการกระจายตัวของแอนติเจนภายหลังการฉีดไม่ดีนัก [1] จึงได้มีการวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์นำส่งยาแบบไม่ใช้เข็มขึ้นมา สามารถจำแนกเป็น 3 ระบบ [2] คือ การนำส่งยาชนิดอนุภาค การนำส่งยาชนิดของเหลว และการนำส่งยาด้วยลำพุ่ง ซึ่งการนำส่งยาด้วยลำพุ่งมีกระบวนการทั้งหมด 3 ระยะ คือ การกัดเซาะผิวหนัง การฉีดของเหลว และการกระจายตัวของของเหลว [3] ซึ่งเป็นที่นิยมเนื่องจากเกิดการกระจายตัวของยาภายในเนื้อเยื่อเป็นบริเวณกว้างกว่าการฉีดยาด้วยเข็มและไซริงค์แบบดั้งเดิม [4] โดยการนำส่งยาด้วยลำพุ่งนั้น ยังจำแนกต้นกำลังในการใช้ขับลำพุ่งเป็น 3 ชนิด ได้แก่ แบตเตอรี่สปริง และแก๊ส ซึ่งต้นกำลังแต่ละชนิดมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน เช่น อุปกรณ์ที่ใช้แบตเตอรี่เป็นต้นกำลัง มีข้อจำกัดด้านความอเนกประสงค์ในการใช้งาน มีส่วนประกอบที่ซับซ้อนและยังมีราคาที่สูงมาก [5] ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้แก๊สเป็นต้นกำลังก็ยังมีข้อจำกัดอยู่มาก Mukda และคณะ [6] ได้พัฒนาอุปกรณ์นำส่งยาด้วยลำพุ่งด้วยหลักการกระแทกที่ใช้แก๊สเป็นต้นกำลัง ซึ่งจะทำให้รูปแบบความดันกระแทกที่ออกมา มีลักษณะเป็นสองลูก และสันนิษฐานว่าจะสร้างความเจ็บปวดที่น้อยกว่าและมีประสิทธิภาพการส่งถ่ายยาที่ดีกว่า แต่อุปกรณ์นี้มีน้ำหนักมากและไม่สะดวกในการใช้งาน อีกทั้งมีปัญหาในการควบคุมความแม่นยำในการฉีดลำพุ่ง ในงานวิจัยนี้ จึงแก้ปัญหาดังกล่าว โดยพัฒนาอุปกรณ์นำส่งยาด้วยลำพุ่งความเร็วสูงที่สร้างจากหลักการกระแทกที่ใช้สปริงเป็นต้นกำลังขึ้นมา โดยใช้หลักการเดียวกันคือการกระแทกและขับผ่านตัวกลาง (Momentum Exchange Method) ซึ่งลูกปืนจะกระแทกลงบนวัตถุอื่นก่อนขับของเหลวออกจากหัวฉีด เพื่อให้การขับของเหลวระหว่างการฉีดลำพุ่งเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

ในงานวิจัยนี้ จะทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยจากอุปกรณ์ อันได้แก่ ปริมาตรบรรจุของหัวฉีดและค่าคงที่ของสปริง ที่มีต่อคุณลักษณะของลำพุ่ง ความดันกระแทก และความเร็วของลำพุ่ง ซึ่งจะได้เป็นข้อมูลเพื่อพัฒนาและปรับปรุงอุปกรณ์ให้มีประสิทธิภาพต่อไป

2. เครื่องมือและวิธีการทดลอง

2.1 ชุดกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูง

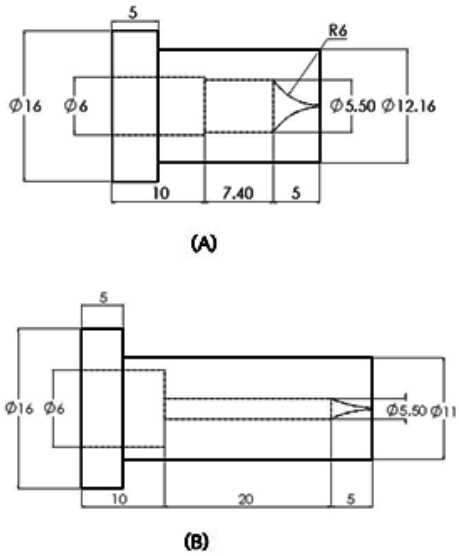
การกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูง จะสร้างจากชุดทดลองและทำการปรับเทียบ โดยชุดทดลองนี้จะประกอบไปด้วยสี่ส่วนหลัก คือ ก้านสปริง (Spring Bar) ลำกล้องปืน (Gun Tube) ชุดไกปืน(Trigger Mechanism) และหัวฉีด (Nozzle) ดังแสดงในรูปที่ 1

รูปที่ 1 ชุดกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูง: 1.ก้านสปริง 2.ลำกล้องปืน 3.ชุดไกปืน และ 4.หัวฉีด

การกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูง ใช้วิธีสร้างลำพุ่งด้วยการกระแทกและขับผ่านตัวกลาง (Momentum Exchange Method) มีหลักการ คือ ให้ลูกปืนที่ถูกปล่อยจากแรงขับของสปริงกระแทกลงบนวัตถุอื่น และวัตถุนั้นไปขับของเหลวออกจากหัวฉีดด้วยความเร็วสูง ซึ่งขณะขับของเหลว แรงสปริงยังขับต่อเนื่องจนของเหลวออกจากหัวฉีดจนหมด

2.2 หัวฉีด

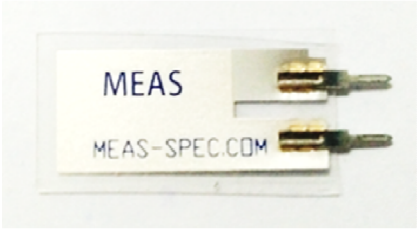
หัวฉีดเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อคุณลักษณะของลำพุ่ง ซึ่งในการทดลองนี้ ได้ใช้หัวฉีดที่ทำมาจากเหล็กชนิด SKD11 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 mm และมีขนาดความจุ 0.2 mL และ 0.5 mL หัวฉีดมีลักษณะเป็นทรงกระบอก (Cylindrical nozzle) ความยาวแปรผันตามปริมาตรบรรจุของเหลว และมีปลายโค้งรูปทรงกรวยที่มีรัศมีความโค้ง 6° ดังแสดงในรูปที่ 2 (A) หัวฉีดปริมาตรบรรจุ 2 mL และ (B) หัวฉีดปริมาตรบรรจุ 5 mL



รูปที่ 2 หัวฉีดที่ใช้ในการทดลอง

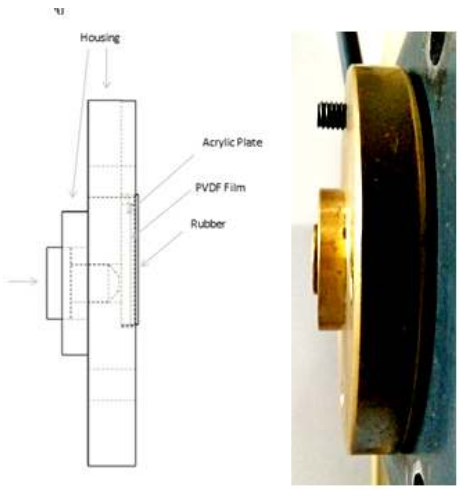
2.3 การวัดความดันกระแทกและความเร็วของลำพุ่ง

เครื่องมือที่ใช้วัดความดันในการทดลอง อาศัยหลักการปล่อยแรงดันไฟฟ้าของแผ่น Polyvinylidene fluoride film หรือแผ่น PVDF แสดงดังรูปที่ 3 แผ่น PVDF สามารถวัดแรงดันจากการปรับเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่แผ่นปล่อยออกมาเมื่อมีวัตถุตกกระทบกับความดันกระแทก



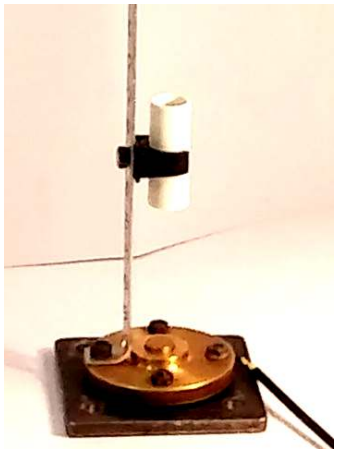
รูปที่ 3 แผ่น Polyvinylidene fluoride film หรือแผ่น PVDF

แผ่น PVDF ถูกติดตั้งไว้ในตัวเรือนโลหะ ซึ่งส่วนหน้าเป็นหัวกดทองเหลืองทำหน้าที่รับแรงกระแทกจากลำพุ่งและส่งถ่ายแรงไปยังแผ่น PVDF ชั้นถัดมาเป็นแผ่นอะคริลิกหนา 0.9 mm ทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับแผ่น PVDF และส่วนที่สามเป็นแผ่น PVDF ที่มีความหนา 28 μm ที่ต่อเข้ากับออสซิลโลสโคป และส่วนที่สี่เป็นแผ่นอะคริลิกหนา 2 mm ทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายของแผ่น PVDF กับแผ่นโลหะทางด้านหลัง ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ชุดเครื่องมือวัดความดัน

การปรับเทียบเครื่องวัดความดันของแผ่น PVDF จะใช้หลักการของ Grinspan [7] ในการปรับเทียบแรงดันไฟฟ้ากับความดันกระแทกของวัตถุบนแผ่น PVDF โดยทำการหาค่าความดันกระแทกจากลูกปืนเหล็กทรงกลมน้ำหนัก 0.45 g ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางการตกกระทบ 0.6 mm ซึ่งชุดปรับเทียบความดันกระแทกแสดงในรูปที่ 5

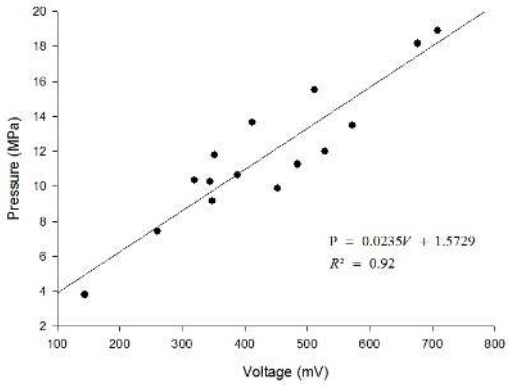


รูปที่ 5 ชุดปรับเทียบความดันกระแทก

การปรับเทียบความดันกระแทก ทำได้โดยการปล่อยลูกปืนเหล็กทรงกลมลงจากท่อนำศูนย์ที่ความสูงแตกต่างกันเป็นจำนวน 15 ความสูง ให้ลูกเหล็กตกกระทบลงบนหัวกดทองเหลือง และส่งถ่ายแรงกระแทกไปยังแผ่น PVDF ซึ่งอยู่ด้านล่างของหัวกด แผ่น PVDF ถูกปิดด้วยแผ่นอะคริลิกไว้ด้านหน้าอีกชั้นหนึ่งเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับตัวฟิล์ม แต่จะสามารถโก่งตัวได้เมื่อได้รับแรงกระแทกและสร้างแรงดันไฟฟ้าขึ้น ทำการจับสัญญาณด้วยเครื่องออสซิลโลสโคปเพื่อหาแรงดันไฟฟ้าและช่วงเวลาตกกระทบ ตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากการปรับเทียบอุปกรณ์ แสดงไว้ในรูปที่ 6

รูปที่ 6 สัญญาณที่ได้จากการปรับเทียบเครื่องมือวัด

และเมื่อนำผลการปรับเทียบมาสร้างกราฟคู่อันดับระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าและความดันกระแทก เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ จะได้ผลดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แผนภาพแรงดันไฟฟ้ากับความดันกระแทก

จากรูปที่ 7 จะได้สมการความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและความดันกระแทกคือ

$$P = 0.0235\,(V) + 1.5729 \qquad (1)$$

เมื่อ P คือ ความดันกระแทก

V คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้า

ในการทดลอง เมื่อลำพุ่งความเร็วสูงกระทบกับตัวกดของเครื่องมือวัดความดัน แผ่น PVDF จะเกิดการโก่งตัว ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นและส่งสัญญาณไปยังออสซิลโลสโคป ซึ่งเมื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดแทนลงในสมการที่ 1 จะได้ความดันกระแทก

การวัดความเร็วลำพุ่งนั้นใช้หลักการการตัดเลเซอร์ของวัตถุ (Laser beam interruption method) แล้วคำนวณค่าความเร็วจากช่วงสัญญาณเวลาที่ขาดหายไป ใช้ตัวกำเนิดแสงเลเซอร์และโฟโต้ไดโอด (Photodiode) สองชุด จัดวางระยะห่างของเซนเซอร์ไว้ที่ 14 mm สามารถคำนวณหาความเร็วได้จากสมการ

$$\bar{V} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \qquad (2)$$

เมื่อ $\bar{V}$ คือ ความเร็ว

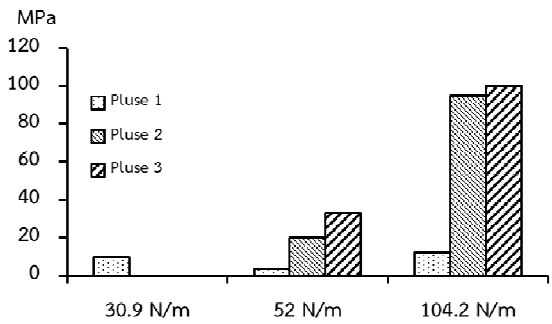
Δs คือ ระยะห่างของเลเซอร์สองตัว

Δt คือ เวลาที่วัดได้จากเครื่องออสซิลโลสโคป

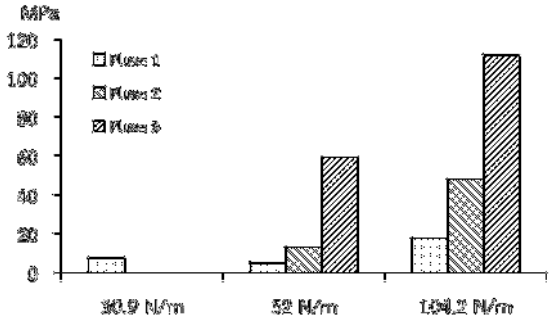
3. ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

3.1 ความดันกระแทกของลำพุ่ง (Impact Pressure)

ความดันกระแทกของลำพุ่งที่วัดได้เมื่อค่าความแข็งของสปริงเท่ากับ 30.9 N/m 52 N/m และ 104.2 N/m ที่ปริมาตร 0.2 mL และ 0.5 mL แสดงดังรูปที่ 8-9 ตามลำดับ พบว่าความแข็งของสปริงและปริมาตรหัวฉีดล้วนส่งผลต่อความดันกระแทกและรูปแบบของความดันที่ได้ โดยค่าคงที่ของสปริงมีอิทธิพลต่อค่าความดันกระแทกโดยตรง คือ ถ้าค่าคงที่ของสปริงที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ความดันกระแทกสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าสูงตามไปด้วย และยังส่งผลต่อจำนวนพัลส์ (Pulse) ของความดันที่เกิดขึ้น จากการทดลองนี้พบว่าพัลส์ของความดันเกิดขึ้นเป็นจำนวนตั้งแต่หนึ่งถึงสามพัลส์ในหัวฉีดทุกๆปริมาตร และจำนวนพัลส์จะเพิ่มขึ้นเมื่อสปริงที่ใช้แข็งขึ้น โดยจำนวนสูงสุดที่พบเป็น 3 ลูก โดยความดันสูงสุดที่ได้จะมีค่าเท่ากับ 112 MPa ที่สปริง 104.2 N/m และหัวฉีดปริมาตร 0.5 mL ทั้งนี้เนื่องจากค่าสปริงที่แข็งขึ้นจะมีแรงดัน ความเร็วกระแทก และโมเมนตัมที่สูง แต่มีข้อสังเกตว่าความดันกระแทกสูงสุดไม่ได้เกิดที่พัลส์ลูกแรกแต่จะเกิดกับลูกที่สาม อันเป็นผลมาจากการตัวได้ของของเหลวในหัวฉีดขณะขับลำพุ่ง



รูปที่ 8 แผนภาพค่าคงที่ของสปริงและความดันกระแทกของหัวฉีดที่ปริมาตรหัวฉีด 0.2 mL

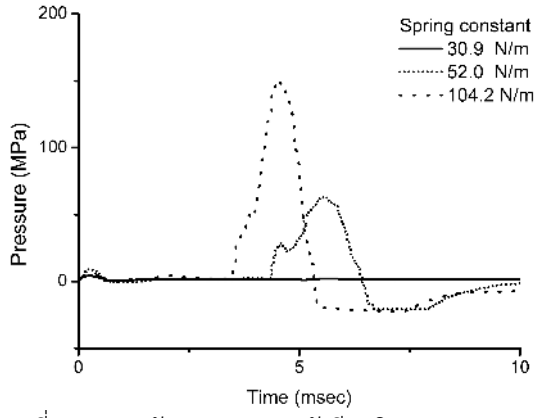


รูปที่ 9 แผนภาพค่าคงที่ของสปริงและความดันกระแทกของหัวฉีดปริมาตร 0.5 mL

ผลการทดลองแสดงยังให้เห็นว่าปริมาตรของของเหลวมีอิทธิพลต่อความดันกระแทกโดย ถ้าของเหลวมีปริมาตรสูงกว่าจะมีแนวโน้มที่จะสร้างลำพุ่งที่มีความดันกระแทกสูงกว่า แต่ต้องขึ้นกับต้นกำลังที่ใช้ขับของเหลวเพื่อกำเนิดลำพุ่งด้วย

3.2 รูปแบบของความดันกระแทก

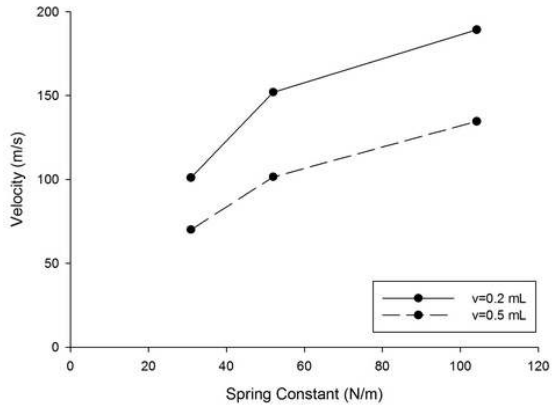
รูปแบบของความดันที่เกิดขึ้น เมื่ออุปกรณ์ใช้สปริงที่มีค่าความแข็งแตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 10 พบว่า ที่ค่าคงที่ของสปริง 30.9 N/m เกิดพัลส์ขึ้นเพียงลูกเดียว และมีความดันสูงสุด เพียง 11.23 MPa ภายในช่วงเวลาน้อยกว่า 1 ms ส่วนค่าคงที่ของสปริง 52 N/m เกิดรูปแบบความดันเป็นลักษณะสามพัลส์ โดยความดันกระแทกลูกแรกมีค่า 5.35 MPa และลูกที่สองใช้เวลาห่างออกไปประมาณ 3 ms มีค่า 13.56 MPa เพิ่มขึ้นจากลูกแรกประมาณ 60.54% ซึ่งเกิดความดันพุ่งขึ้นอย่างรวดเร็วและตกลงมาในเวลาอันสั้น ก่อนจะเกิดความดันลูกที่สามซึ่งเป็นความดันสูงสุด มีค่า 72.2 ms เพิ่มขึ้นจากลูกแรกประมาณ 92.59 % และเพิ่มขึ้นจากลูกที่สองประมาณ 81.22% และที่ค่าคงที่ของสปริง 104.2 N/m เกิดความดันขึ้นจำนวน 3 พัลส์ ซึ่งความดันลูกแรกเท่ากับ 20 MPa ลูกที่ 2 เท่ากับ 50 MPa เพิ่มขึ้นจากลูกแรก 60% และความดันสูงสุดของหัวฉีดนี้ คือ 120 MPa เพิ่มขึ้นจากลูกแรก 83.33% และเพิ่มขึ้นจากลูกที่สอง 58.33% โดยมีการพุ่งขึ้นของค่าความดันอย่างรวดเร็วและตกลงอย่างรวดเร็วที่ลูกที่สาม สรุปได้ว่าการเกิดพัลส์แต่ละลูกนั้นได้ว่า เมื่อค่าความแข็งสปริงเพิ่มขึ้นจะมีระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากการขับของเหลวที่มีพฤติกรรมแบบกดอัดได้จะใช้เวลายาวนานขึ้น



รูปที่ 10 ความดันกระแทกจากหัวฉีดปริมาตร 0.2 mL ที่ค่าคงที่ของสปริงแตกต่างกัน

3.3 ความเร็วลำพุ่ง (Jet Velocity)

จากการทดลองวัดความเร็วของลำพุ่งด้วยชุดเลเซอร์ โดยปรับเปลี่ยนค่าคงที่ของสปริงจำนวนสามค่าและหัวฉีดจำนวนสองปริมาตร บันทึกสัญญาณของช่วงเวลาและคำนวณเป็นค่าความเร็วตามสมการที่ (2) จากนั้นสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของสปริงกับความเร็ว โดยมีเงื่อนไขที่เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดเท่ากัน และปริมาตรของของเหลวที่บรรจุในหัวฉีดเท่ากัน ได้กราฟดังแสดงในรูปที่ **10**



รูปที่ 11 แผนภาพของค่าคงที่ของสปริงและความเร็วเมื่อหัวฉีดมีปริมาตรต่างกัน

จากกราฟพบว่าที่หัวฉีดที่เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน มีแนวโน้มความเร็วของหัวฉีดทั้งสองปริมาตร

เพิ่มขึ้นเมื่อค่าคงที่ของสปริงเพิ่มขึ้น เป็นไปตามหลักการอนุรักษ์โมเมนตัมของแรงจากสปริง ค่าคงที่ของสปริงที่มากจะกำเนิดแรงผลักที่มากกว่าซึ่งจะไปดันให้หัวกดดันของเหลวที่บรรจุอยู่ในหัวฉีดออกไปอย่างรวดเร็วกว่า และยังพบว่าลำพุ่งที่กำเนิดจากหัวฉีดปริมาตร 0.2 mL มีความเร็วมากกว่าลำพุ่งที่กำเนิดจากหัวฉีดปริมาตร 0.5 mL ในทุกๆค่าคงที่ของสปริง เนื่องจากถ้าใช้แรงเท่ากันในการขับของเหลวออกจากหัวฉีด ของเหลวที่มีมวลน้อยกว่าจะถูกขับออกได้อย่างรวดเร็วกว่าตามหลักการการอนุรักษ์โมเมนตัม แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าแนวโน้มของความเร็วไปเป็นไปตามความดันกระแทกที่วัดได้เนื่องจากความเร็วที่วัดได้เป็นความเร็วของพัลส์ลูกแรก ซึ่งมีแรงดันกระแทกต่ำกว่า เพราะการฉีดอาจมีลักษณะการเป็นละอองมากกว่าเป็นแกน น้อยกว่าลูกสองและสามที่ตามมา ซึ่งเครื่องมือวัดความเร็ววัดไม่ได้

5. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้สร้างต้นแบบของอุปกรณ์นำส่งยาแบบไม่ใช้เข็มที่สร้างจากหลักการกระแทกที่ใช้สปริงเป็นต้นกำลัง และสร้างเครื่องมือวัดความดันจลน์จากแผ่น PVDF เพื่อใช้ในการวัดความดันกระแทกของลำพุ่งที่สร้างขึ้นจากชุดต้นแบบ รวมถึงศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความดันกระแทกของลำพุ่ง คือขนาดความจุของหัวฉีด และค่าคงที่ของสปริงที่แตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่าทั้งสองปัจจัยมีอิทธิพลต่อความเร็วและความดันกระแทกของลำพุ่ง รวมไปถึงรูปแบบของความดันที่เกิดขึ้น และอุปกรณ์นำส่งยาแบบไม่ใช้เข็มที่สร้างจากหลักการกระแทกที่ใช้สปริงเป็นต้นกำลังที่ออกแบบและสร้างขึ้นนี้ มีความดันกระแทกที่เหมาะสมในการใช้งานกับมนุษย์และการปศุสัตว์ต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการวิจัยนี้

7.เอกสารอ้างอิง

[1] วิระพันธ์ สีหานาม (2557).การฉีดยาด้วยลำพุ่งความเร็วสูง:อุปกรณ์และพฤติกรรมการฉีด, *วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.*,7, กรกฎา-ธันวาคม 2557, หน้า 113-124.

[2] Tejaswi R. Kale and Munira Momin (2014). Needle free injection technology - An overview, *Innovation in Pharmacy* , vol. 5(1) , pp.1-8.

[3] Schramm Baxter J. , Katrencik J. and Mitragotri S. (2004). Jet injection into polyacrylamide gels: investigation of jet injection mechanics, *J Biomech*, vol.37, August 2004 ,pp. 1181-8.

[4] Baxer J. (2004) .Fundamental Mechanisms of Drug Delivery by Jet Injection: Basis for the Development of a Painless Microjet Injector,Doctoral thesis,University of California , Santa Barbara,CA

[5] C. Scanlon Daniels and Circle H Headquarters (2010). Needle-Free Injection: Pros and Cons, High Plains Dairy Conference, Amarillo, Texas

[6] P. Mukda, K. Pianthong and W. Seehanam (2017). A new concept of needle-free jet injector by impact driven method, *Jornal of Medical Devices*, vol.11, March 2017, pp. 1-10.

[7] A. Sahaya Grinspan and R. Gnanamoorthy (2010). Impact force of low velocity liquid droplets measured using piezoelectric PVDF film, *Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol.356, January 2010, pp. 162-168.